

## Establishing an Axion Experiment in Korea

Woohyun CHUNG\* · Sung Woo YOUN

Center for Axion and Precision Physics Research,  
Institute for Basic Science, Daejeon 34141, Korea

(Received 3 July 2016 : revised 12 July 2016 : accepted 12 July 2016)

The axion is an attractive dark-matter candidate motivated by the Peccei-Quinn solution to the strong-CP problem in nuclear physics. The main research goals of the Center for Axion and Precision Physics Research (CAPP) of the Institute for Basic Science (IBS) are to establish a state-of-the-art axion experiment in Korea and to search for relic axion particles that are converting to microwave photons in resonant cavities submerged in strong magnetic fields. The initial stage of construction for our axion experiment, the CAPP Ultra-Low-Temperature Axion Search in Korea (CULTASK) at the Korea Advanced Institute for Science and Technology (KAIST) Munji Campus, has been completed and involved the successful installation of two new dilution refrigerators (one with an 8 T superconducting magnet) with the capability of cooling the cavities to less than 50 mK. We present our ongoing R&D efforts and discuss our future plans.

PACS numbers: 81.05.Ea, 85.30.Tv

Keywords: Axion, Dark matter, CAPP, CULTASK

## 한국 최초의 액시온 검출 장치

정우현\* · 윤성우

기초과학연구원 액시온 및 극한상호작용연구단, 대전 34141, 대한민국

(2016년 7월 3일 받음, 2016년 7월 12일 수정본 받음, 2016년 7월 12일 게재 확정)

액시온은 핵물리학에서 strong-CP 문제를 해결하기 위한 Pecci-Quinn 제안에 의해 탄생된 매력적인 암흑물질 후보다. 기초과학연구원의 액시온 및 극한상호작용 연구단(CAPP)은 최고 수준의 액시온 실험을 한국에 구축하는데 주력하여 강한 자기장하에 놓여진 공진기속에서 광자로 변환되는 원시 액시온을 검출하려한다. 그 첫걸음으로 카이스트 문지 캠퍼스에 두대의 희석 냉동기(그 중 한대는 8 T 초전도 자석을 장착)를 설치하여 공진기의 온도를 50 mK까지 내릴 수 있는 한국 최초의 액시온 실험인 CULTASK(CAPP Ultra Low Temperature Axion Search in Korea)를 구축하고 있다. 현재 진행 중인 R&D 프로젝트와 가까운 장래 계획을 살펴본다.

PACS numbers: 81.05.Ea, 85.30.Tv

Keywords: 액시온, 암흑물질, CAPP, CULTASK

---

\*E-mail: [gnuwcw@ibs.re.kr](mailto:gnuwcw@ibs.re.kr)



## I. 암흑물질과 액시온

입자물리학에서는 오늘날 관측되고 있는 우주의 물질-반물질의 불균형을 전하-거울대칭 위반 (charge-parity symmetry violation, CPV)이라는 현상으로 설명하고 있다. 표준모형 (standard model)에 의하면 이 CPV는 전기약한 상호작용 (electroweak interaction)에서 이론적으로 묘사되고 있고 실험적으로 잘 뒷받침이 되고 있다. 반면 강한 상호작용 (strong interaction)을 기술하는 이론인 양자 색역학 (quantum chromodynamics, QCD)에서는 그 라그랑지안에 CPV 항을 자연스럽게 허용하면서 중성자가 전기쌍극자 (EDM)를 가져야한다고 예측을 하는데 현재까지 실험상으로는 발견하지 못하고 있다. 자연은 강한 상호작용에서 CP 대칭을 존중하는 것처럼 보이는 것이다. 이러한 이론과 실험사이의 대립을 강한 상호작용의 CP 문제 (strong CP problem)라고 부르는데 물리학에서 아주 중요하면서도 여태껏 풀리지않은 문제로 남아있다.

1977년 두 과학자 (Roberto Peccei and Helen Quinn)는 이 문제에 대한 우아한 (elegant) 해답을 제시하게 된다 [2, 3]. 그들은 PQ 대칭이라는 범대칭을 도입해서 이 위반항을 상쇄시키는 이론을 만들었는데, 그 자발적 PQ 대칭 깨짐이 일어나는 과정에서 부수적으로 얻어지는 입자 (goldstone boson)가 바로 액시온이다. 액시온이라는 이름은 2004년 노벨상 수상자인 Frank Wilczek이 이런 문제를 깨끗이 씻어낸다는 의미에서 유명한 세제 상표로부터 그 이름을 따온 것이다.

액시온 이론에 의하면 빅뱅 (Big Bang) 과정에서 무수한 액시온이 생성되는데 (원시 액시온), 우주 급팽창에 이은 질량 생성 과정에서 발생하는 상당량의 운동 마찰력이 액시온으로부터 운동 에너지를 흡수해 버리고, 이로 인해 우주는 원시 액시온의 매우 차가운 (운동 속도가 빛의 속도보다 훨씬 작다) 응축물로 가득차 있을 것이라고 예측된다. 이런 액시온은 전하를 띠고 있지 않고  $10^{-6} \sim 10^{-3} \text{ eV}/c^2$ 의 매우 작은 질량을 가질 것으로 추정된다. 또한 강한 상호작용과 약한 상호작용에 관여하지 않으면서 중력이나 전자기력과도 미미한 반응을 하기 때문에 눈에 보이지도 않고 (invisible) 관측이 매우 힘들다. 이러한 입자의 특성 때문에 만일 액시온 입자가 존재한다면 원시 액시온의 질량에 따라, 액시온 이론은 현재 관측되는 우주의 질량과 에너지의 약 27%를 차지하고 있는 암흑물질 문제를 적절하게 설명하게 된다.

앞서 기술한 액시온의 생성 메커니즘이 1992년 발견된 힉스 입자의 메커니즘과 비슷하다는 점과 또 다른 유력한 암흑물질 후보인 WIMP (weakly interacting massive particle)가 아직도 발견되지 않았다는 점에서 오늘날 그 존재에 대한 흥미를 더해가고 있다.

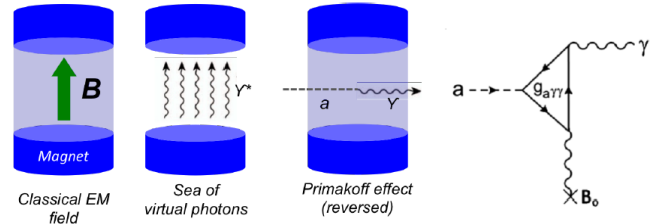


Fig. 1. (Color online) Schematic view of the reversed Primakoff effect. A strong magnetic field produces a sea of virtual photons with which halo axions interacts to generate real photons (left). The corresponding Feynman diagram of the reversed Primakoff effect (right).

## II. 액시온의 검출

그럼 이처럼 보이지 않는 입자를 어떻게 검출할 수 있을까? 1983년 이론물리학자인 Pierre Sikivie는 높은 에너지의 광자가 원자핵과 전자기 상호작용 (다른 광자와 산란)을 일으켜 가상스칼라 보손 (pseudoscalar boson)을 생성하는 Primakoff 효과로부터 영감을 얻는다. 그는 Primakoff 효과의 역과정 (reversed process)가 가능하다면 라디오 주파수 공진기 (RF cavity)에서 액시온이 마이크로파 광자로 변환될 수 있고 그 광자를 검출함으로써 액시온 입자를 발견할 수 있다는 아이디어를 내놓게 된다 [4]. 좀 더 정확히 기술한다면 RF 공진기를 강한 자기장 안에 놓으면 자기장에 의해서 생겨나는 가상 (virtual) 광자와 액시온이 반응하여 실제 (real) 광자를 내놓게 되는데 이 광자의 신호 (파워)를 측정한다는 것이다 (Fig. 1). 이것이 현재 액시온 검출 실험에서 전형적으로 사용하고 있는 haloscope의 원리이자 가장 유망한 방법으로 여겨지고 있다.

실제 이런 검출 원리는 전 세계에서 실행되고 있는 액시온 실험들의 발판을 마련하고 있다. Fig. 2는 레이저, 망원경, RF 공진기 등 여러가지 방법들을 이용해 액시온을 검출하려는 노력을 요약하고 이론적으로 정립된 두개의 기준 시나리오 (KSVZ [5, 6]와 DFSZ [7, 8])와 비교하고 있다. 암흑물질로서 허용된 액시온 질량 범위 ( $1 \mu\text{eV} \sim 1 \text{ meV}$ )에 가장 감도가 높은 접근법이 바로 RF 공진기를 이용한 것이고 향후 10년간 활발하게 탐험될 것으로 기대된다는 점은 주위를 기울일 만하다.

RF 공진기 내에서 액시온으로부터 전환된 마이크로파 광자의 파워 ( $P_{a \rightarrow \gamma\gamma}$ )는 다음과 같이 표현할 수 있는데,

$$P_{a \rightarrow \gamma\gamma} = g_{a\gamma\gamma}^2 \frac{\rho_a}{m_a} B^2 V C \text{Min}(Q_L, Q_a), \quad (1)$$

여기서  $g_{a\gamma\gamma}$ 는 액시온-광자 coupling 상수,  $\rho_a$ 는 액시온 밀도,  $m_a$ 는 액시온 질량,  $B$ 는 외부 자기장,  $V$ 는 공진기 부피,  $C$ 는 공진 모드에 따라 결정되는 폼팩터 (form factor), 그

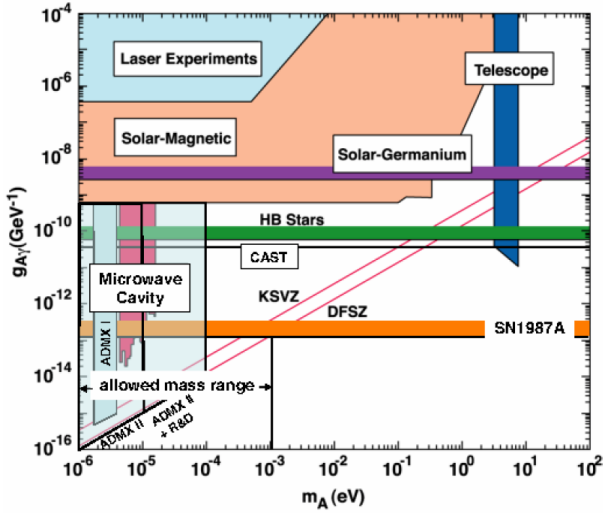


Fig. 2. (Color online) Overview of axion searches. Experimental (or observational) sensitivities are shown in terms of strength of the axion-to-photon coupling as a function of the axion mass. Two red diagonal lines represent the two benchmark scenarios which has been theoretically well established.

리고  $Q_L$ 와  $Q_a$ 는 각각 공진기와 액시온의  $Q$  값이다. 또한 실험의 감도를 결정하는 중요한 물리량으로 신호대 잡음비 (signal-to-noise ratio, SNR)를 들 수 있는데 다음과 같이 주어진다.

$$\text{SNR} \equiv \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} = \frac{P_{a \rightarrow \gamma\gamma}}{k_B T_{\text{sys}}} \sqrt{\frac{t_{\text{int}}}{\Delta f_a}}, \quad (2)$$

여기서  $k_B$ 는 Boltzmann 상수,  $T_{\text{sys}}$ 는 시스템 온도,  $t_{\text{int}}$ 는 integration 시간,  $\Delta f_a$ 는 액시온 주파수 대역폭 (frequency bandwidth,  $\sim 10^{-6} f_a$ )이다.

전형적인 액시온 검출 실험에서는 감도를 향상시키기 위해 여러가지 방법을 강구하고 있는데, Eq. (1)과 (2)에서 볼 수 있듯이 내구경이 크면서 강한 자기장을 만들어낼 수 있는 전자석이 가장 결정적인 역할을 한다. 또한 잡음을 줄이기 위해 극저온( $\sim 100$  mK)의 환경이 요구되기 때문에 희석 냉각기가 필요하다. 한편 공진기의  $Q$ 값을 높이는 것도 실험의 감도를 향상시키는 하나의 방법이다.

### III. 액시온 및 극한상호작용 연구단

기초과학연구원의 액시온 및 극한상호작용 연구단 (이하 줄여서 CAPP, Center for Axion and Precision Physics Research)은 세계 최고 수준의 액시온 연구를 지향하고 그에 걸맞는 시설과 장비를 확보하여 10년내에 액시온의 존재 여부를 탐색하고 확인하기 위하여 설립되었다. CAPP의 액

시온 연구 프로그램은, CERN과의 공동 연구하에 진행하는 CAPP-CAST, 근거리 힘을 (short range force) 탐색하는 MRI 형태의 실험인 ARIADNE 등도 있으나, 주 실험은 Sikivie가 주창한 Haloscope를 이용한 마이크로파 공진기 실험이다. CAPP이 구축하고자하는 고주파 공진기를 이용한 액시온 검출 장치를 살펴보자. 액시온은 초고자기장하에 놓인 높은  $Q$ 값을 가진 고주파 공진기안에 광자로 변환되며 (Primakoff 효과) 여기서 발생된 미약한 RF 신호를 감도가 뛰어난 SQUID 증폭기를 통해 RF 데이터 신호 처리를 하게된다. 공진기를 비롯해서 SQUID를 통과할때까지의 모든 과정은 잡음의 극소화를 위해 초극저온하에서 이루어져야 한다. CAPP은 카이스트 문지 캠퍼스 창조관 동편을 개조해서 주 액시온 실험실을 구축 중이며, 일부 완성된 실험실에 극초저온용 희석 냉동기 2기를 설치 완료하여 RF 증폭기와 여러가지 공진기의 테스트가 이미 진행중이다. 여기서 기존의 액시온 실험인 ADMX 검출장치 [9]를 살펴볼 필요가 있다. ADMX 공진기는 내경 40 cm, 높이 1 m가량의 실린더형이고 이 공진기를 싸고있는 솔레노이드 (solenoid) 형 8 T 자기장의 초전도 자석이 중심이며 증폭기와 주파수 변환장치 (구리 도금이 된 봉의 위치로 TM010 mode의 공진 주파수를 변환시킨다) 등이 함께 2 K 정도의 온도를 유지해 주는 냉각기안에 위치해 있다. 공진기의  $Q$ 값은 50,000 정도이고 이러한 구성의 검출기로 460 MHz ( $1.9 \mu\text{eV}$ )에서 860 MHz ( $3.5 \mu\text{eV}$ ) 정도까지 스캔했으며 그 범위안에 액시온이 존재하지 않음을 90%의 신뢰도로 증명했다. 이론적으로 가능한 액시온의 질량의 범위가  $1 \mu\text{eV}$ 에서  $100 \mu\text{eV}$ 인점을 감안하면 아직 갈 길이 먼 셈이다. ADMX는 최근 미국 에너지성의 승인을 받아 차세대 암흑물질 탐구 실험에 선정되어 새로운 희석 냉각기를 구축했으며 공진기와 증폭기의 온도를 300 mK까지 내리고 고주파수 영역의 공진기를 설계하는등 실험 감도를 높이고 스캔 시간을 줄이는 노력을 기울이는 중이다.

### IV. CAPP의 R&D 프로젝트

후발 주자로서 CAPP의 계획은 한편으로는 ADMX와 공동연구를 통해 선지식을 습득하고 다른 한편으로는 지역 국책 연구소나 대학의 인적자원을 통해 양적으로나 질적으로 월등히 우수한 검출기를 구축하는 것이다. 기존 액시온 실험보다 월등한 수준의 액시온 검출기를 구축하기위한 CAPP의 R&D 연구는 초전도 자석의 개발 및 제작, 높은  $Q$ 값의 공진기, 그리고 차세대 SQUID 증폭기의 연구 개발로 나눌 수 있다 (Fig. 3).

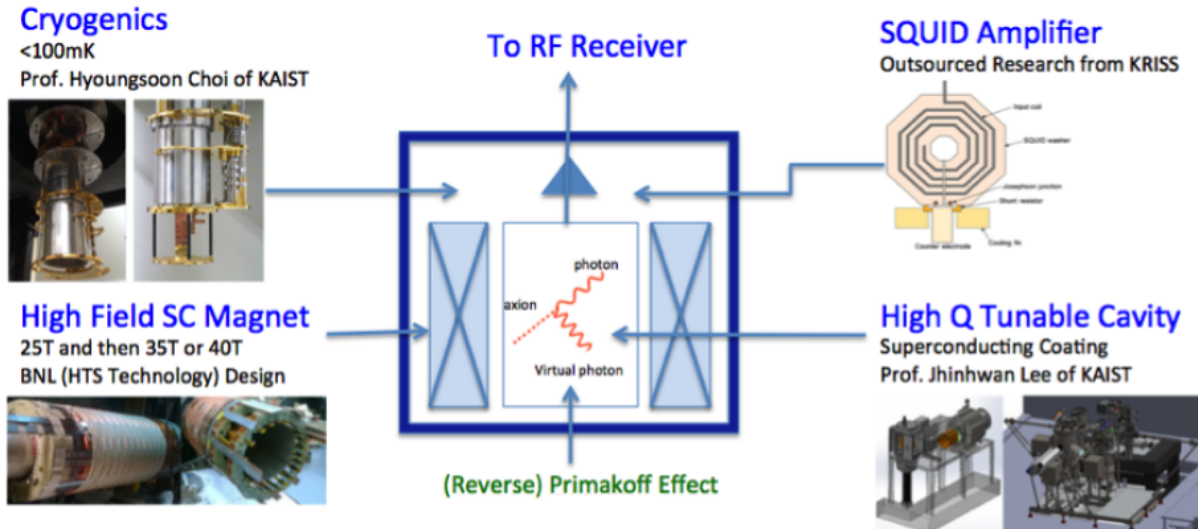


Fig. 3. (Color online) CAPP's microwave axion research RD programs.

이전 섹션에서 언급된 식에서 볼 수 있듯이 액시온의 광자로의 변환 확률은 공진기의 체적과  $Q$  값 그리고 자기장의 강도의 제곱에 비례한다. 검출기의 감도를 높이고 빠른 시간에 많은 양의 데이터를 받기 위해서는 강력한 자석이 절대적으로 필요하다. 최근 초전도체 기술의 비약적인 발전에 힘입어 20 Tesla 이상의 초극 자기장을 만들어 낼 수 있는 차세대 초전도자석들이 개발되고 있으며, CAPP은 미국의 BNL (Brookhaven National Laboratory)의 Superconducting Magnet R&D Group과의 공동연구로 초극 고자기장 (25 T) 초전도 자석 개발 (3년 프로젝트)을 진행하고 있다. BNL에서 개발 중인 25 T 초전도 자석은 내경이 10 cm의 HTS (high temperature superconductor) 기술이 적용된 콤팩트 (외경 30 cm)한 디자인이며 일반 초전도 자석을 외부에 한 겹 더할 경우 35 T나 40 T까지도 가능하다. 이 자석외에도 국내 업체와의 합작으로 5 cm 내경의 20 T HTS 자석과 국외 업체인 Oxford에서 제작할 35 cm 내경의 12 T 자석등, 공진기의 체적을 늘리는 동시에 여러 주파수 영역을 커버할 수 있는 방안을 마련 중이다.

강력한 자기장과 함께 검출 감도에 많은 영향을 주는 것이 공진기의  $Q$  값이다. 고순도 구리로 제작한 공진기 경우 대략 20,000에서 40,000 정도이고 초저온에서는 50,000에서 100,000 정도의  $Q$  값을 가지지만 고자기장하에서는 이마저도 자기저항 (magnetoresistance) 때문에 절반 이상 떨어지게 된다. 액시온의  $Q$  값이  $10^6$  정도임을 감안하면 10 배 이상 개선할 여지가 있는 셈이다. 초전도체로 공진기 내부를 코팅하여  $Q$  값을 높이는 기술은 소립자 물리학 실험의 가속기에 쓰이는 공진기에는 널리 쓰여 왔으나, 액시온 실험의 고자기장하에서는 일반 초전도체는 초전도성을 잃게된다. CAPP은 카이스트 물리학과와 이진환 교수팀과

공동으로 고자기장하에서도 초전도성을 유지하는, 임계 자기장이 높은 2종 초전도체로 공진기 내부를 코팅하는 연구를 진행중이다 (2~3년 프로젝트).

CAPP의 또 하나의 R&D 프로젝트는 차세대 SQUID 증폭기의 개발이다. 초극 고자기장과 높은  $Q$  값의 공진기가 갖춰졌다해도 아주 미약한 ( $\sim 10 \sim 24$  Watt) RF 신호를 처리해야 하기 때문이다. 잡음을 최대한 줄이고 신호를 높이기 위해 기존의 증폭기로는 불가능한 양자한계 SQUID 증폭기가 필요하며 이를 위해 위탁연구과제로 KRISS (Korea Research Institute of Standards and Science)의 이용호 박사팀이 2 GHz에서 10 GHz의 주파수 영역에서 사용 가능한 증폭기를 5년 (3년차) 계획으로 개발 중이다. 또한 이와 병행하여 Univ. of California, Berkeley의 Irfan Siddiqi 교수가 개발하여 ADMX 실험에 사용 예정인 JPA (Josephson Parametric Amplifier) [10]와 독일 회사인 ez-SQUID [11]의 증폭기의 사용도 함께 추진중이다.

## V. 초저온 액시온 실험 구축

CAPP의 한국 최초 액시온 실험은 CULTASK (CAPP Ultra Low Temperature Axion Search in Korea)이며 카이스트 문지 캠퍼스에 성공적으로 설치된 두대의 희석 냉동기 (BlueFors LD400)로 구동된다. 두 냉동기 모두 희석 냉동기 (dilution refrigerator)로서 많은 양의 헬륨을 필요로 하지 않으며 짧은 시간 (24시간내)에 초저온인 10 mK (base temperature) 아래로 도달할 수 있다. 그 중 한대는 24개의 RF port를 장착, RF 소자인 HEMT (High-Electron-Mobility Transistor) 증폭기와 순환장치 (Circulator) 그



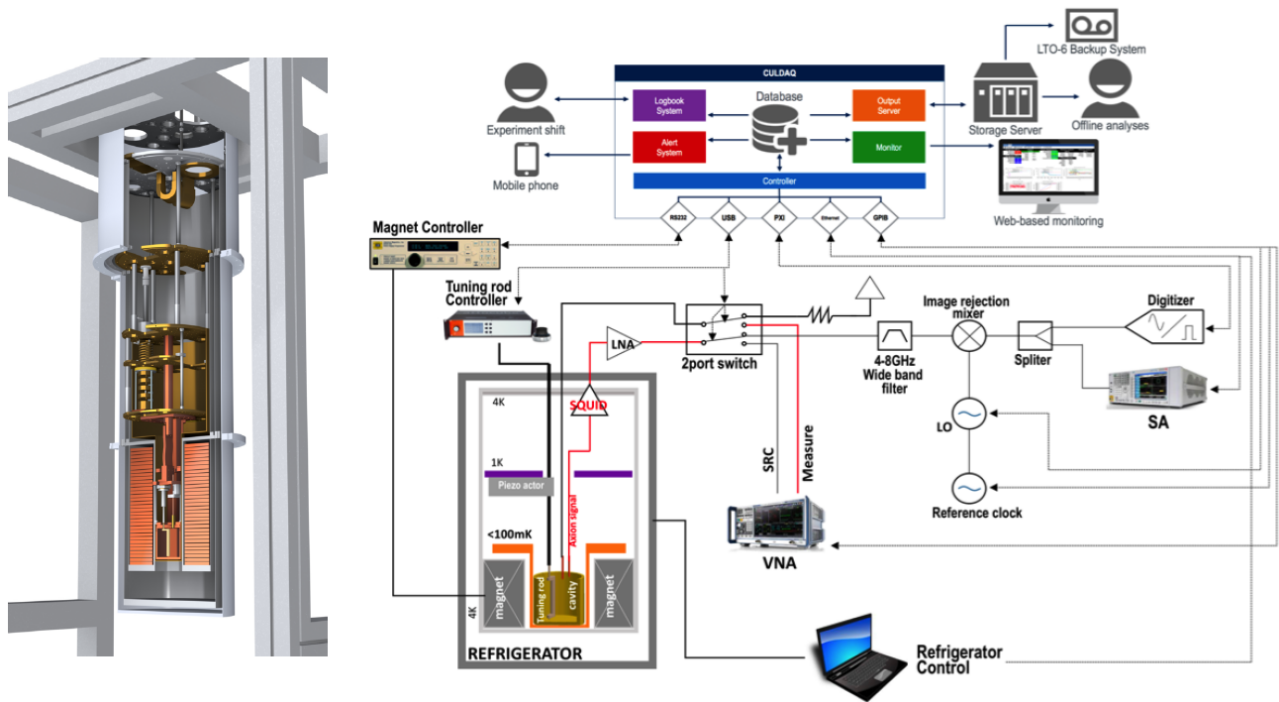


Fig. 4. (Color online) Resonant cavity and frequency tuning system with superconducting magnet inside dilution refrigerator (left). System diagram for axion detector signal processing and data acquisition (right).

리고 공진기와 주파수 변환장치의 초저온 특성 테스트에 사용되고, 나머지 한대는 장착된 8 T 초전도 자석 (NbTi) 과 함께 공진기, 주파수 스캔장치, RF 신호 처리장치 그리고 제어 및 모니터링 장치를 결합해서 온전한 액시온 검출 장치를 연내에 구축하는데 사용될 예정이다.

Fig. 4은 냉동기안에 설치된 공진기와 주파수 스캔장치, 그리고 전체 액시온 검출장치의 도면이다. 고순도 구리로 제작된 공진기와 피에조 작동기 (piezoelectric actuator)를 이용한 주파수 스캔장치는 지지 구조물과 함께 이미 설치되었으며, 4 K의 잡음온도 (noise temperature) 특성을 가진 저잡음 저온용 HEMT 증폭기를 연결하여 테스트 중이다. 현재 공사 중인 무진동 시설은 준공을 3개월 앞두고 있으며 주면시설 (infrastructure)이 모두 완성 되면 최대 7대의 냉동기의 동시 구동이 가능해진다. 2016년 말에 들어올 4대의 희석 냉동기와 3대의 초전도 자석으로 대형 액시온 실험을 계획, 추진 중이다. 3년 내에 초극자기장의 초전도자석의 제작, 초전도 공진기 그리고 차세대 증폭기의 제작과 그리고 테스트가 완료되면 검출기의 감도는 QCD 액시온의 발견이 가능한 곳에 다다를 수 있을 것이다.

## VI. 결론

암흑물질의 규명은 물리학의 당면한 숙제 중 하나이며 액시온은 암흑물질의 가장 매력적인 후보 중의 하나이다.

기초과학연구원의 액시온 연구단은 액시온 검출장치를 한국에 구축하고 그 분야에서 세계적인 중심이 되고자 여러 분야의 R&D 연구를 통해 많은 노력을 기울이고 있다. 2016년 내에 가동될 초저온 액시온 탐색연구 (CULTASK)를 시작으로 본격적인 연구에 들어가 5년내에 가장 강력한 액시온 실험장치를 갖추고 이분야에 선도적인 역할을 하게 될 것이다. 액시온의 발견은 우주를 이해하고자 하는 우리의 노력에 거대한 이정표가 될 것이다. 더 많은 사람들의 관심을 기대해 본다.

## 감사의 글

이 논문은 IBS-R017-D1-2016-a00/IBS-R017-Y1-2016-a00 지원을 받아 수행된 연구입니다. This work was supported by IBS-R017-D1-2016-a00/ IBS-R017-Y1-2016-a00.

## REFERENCES

- [1] T. Manne, *Nucl. Phys. B* **167**, 170 (2006).
- [2] R. Peccei and H. Quinn, *Phys. Rev. Lett.* **38**, 1440 (1977).

- [3] R. Peccei and H. Quinn, [Phys. Rev. D \*\*16\*\*, 1791 \(1977\)](#).
- [4] P. Sikivie, [Phys. Rev. Lett. \*\*51\*\*, 1415 \(1983\)](#).
- [5] J. E. Kim, [Phys. Rev. Lett. \*\*43\*\*, 103 \(1979\)](#).
- [6] M. Shifman, A. Vainshtein and V. Zakharov, [Nucl. Phys. B \*\*166\*\*, 493 \(1980\)](#).
- [7] M. Dine, W. Fischler and M. Srednicki, [Phys. Lett. B \*\*104\*\*, 199 \(1981\)](#).
- [8] A. Zhitnitsky, [Sov. J. Nucl. Phys. \*\*31\*\*, 260 \(1980\)](#).
- [9] S. J. Asztalos, G. Carosi, C. Hagmann, D. Kinion and K. van Bibber *et al.*, [Phys. Rev. Lett. \*\*104\*\*, 041301 \(2010\)](#).
- [10] B. Schmidt and M. Mück, [Appl. Phys. Lett. \*\*100\*\*, 152601 \(2012\)](#).
- [11] K. O'Brien, C. Macklin, I. Siddiqi, and X. Zhang, [Phys. Rev. Lett. \*\*113\*\*, 157001 \(2014\)](#).